

## OBTENCION AUTOMATICA DE MODELOS NUMERICOS DEL TERRENO

C. MARTIN, J.M. CARRANZA, F. GOMEZ y P. ALVAREZ

Instituto de Astrofísica de Canarias. Vía Láctea, s/n. 38200 La Laguna. Santa Cruz de Tenerife

### RESUMEN

Los métodos clásicos para la obtención de modelos numéricos del terreno (MNT), partiendo de pares aéreos estereoscópicos, se basan en la utilización de dispositivos de cálculo analógicos o semianalógicos (restituidores, etc.) manejados por personal especializado.

En esta comunicación presentamos un nuevo enfoque que, mediante el procesado de imágenes, nos ha permitido obtener MNTs y sus derivados (mapas, ortofotografías, etc.) con rendimientos y precisiones comparables a los métodos clásicos comerciales. El proceso es casi totalmente automático y sólo requiere una computadora de propósito general de tamaño medio o pequeño.

Partiendo de los elementos básicos habituales (par aéreo estereoscópico y apoyo en campo), este proceso pasa por el digitalizado y acondicionamiento de las imágenes, análisis de correlaciones, filtrado de resultados e interpolación, hasta llegar al resultado final, el MNT.

Asimismo, presentamos una de las aplicaciones básica del MNT: la obtención de ortofotografías por métodos digitales.

**Palabras clave:** Fotogrametría, Restitución automática, Modelo numérico, Ortofotografía.

### ABSTRACT

Classical methods to obtain digital terrain models (DTM) from aerialstereopairs, are based on the use of analogue or semianalogue calculators (stereoplotters, etc.) handled by specialized operators.

In this communication we present a new approach which, by means of image processing, allows us to generate DTMs and derived products (maps, ortophotos etc.) with similar efficiency and precision to the usual commercial methods. The process is almost completely automatic and requires a general purpose computer of medium or small size.

Starting from the normal basic elements (aerial stereopair and field data),this process encompasses digitizing and conditioning of the images, correlation analysis,results filtering and interpolation, so yielding the final product: the DTM.

Likewise, we present one of the basic applications of DTMs: digital orthophoto generation.

**Key words:** Photogrammetry, Automatic stereoplotting, Digital model, Orthophoto.

## 1. INTRODUCCION

En tiempos recientes, el desarrollo de los ordenadores y los métodos de tratamiento y análisis de imágenes están permitiendo abordar la realización de procesos fotogramétricos por métodos digitales ya sea con intervención humana o de forma automática. Es particularmente atractivo el proceso de restitución estereoscópica de imágenes de satélite que, por su naturaleza, son de tipo digital (Perlant, et al., 1988). También se han realizado trabajos en fotogrametría de rango corto aplicada a diversos campos: industria, robótica, medicina, etc. (Grün, 1989).

En el campo de la fotogrametría aérea, a pesar de la utilización de un soporte analógico para los datos (fotografía), son múltiples las nuevas posibilidades que ofrecen las técnicas digitales: interactividad, facilidades de presentación y gestión, automatización, etc.

En este trabajo describimos una aplicación informática que, basada en el tratamiento de imágenes, permite la obtención de ortofotografías y modelos numéricos del terreno a partir de fotografías aéreas, en ordenadores de propósito general de tamaño medio o pequeño.

A continuación describimos en sus diferentes partes el programa desarrollado íntegramente por nuestro grupo en el Instituto de Astrofísica de Canarias.

## **2. PROCESO PREVIO**

### **2.1. DIGITALIZACION DE LOS FOTOGRAMAS**

Los fotogramas se digitalizan en un microdensitómetro ((Perkin-Elmer PDS-1010A) con una rendija cuadrada de 50 micras de lado y un paso entre píxeles de 50 micras igualmente. Con estos parámetros un fotograma de tamaño típico (9 pulgadas) se convierte en una matriz de 4.300 x 4.300 píxeles. El tamaño de pixel se ha elegido en función de la precisión requerida y el volumen en disco necesario para contener un fotograma. Los resultados obtenidos indican que esta resolución es suficiente para esta aplicación.

La medida de un fotograma se puede realizar tanto en densidades ópticas como en transmitancias. Nuestras pruebas no dan indicios de que ninguna de las dos magnitudes sea más adecuada que la otra de manera general para nuestro propósito. Asimismo, hemos comprobado que es suficiente una resolución de 8 bits en dicha medida (256 niveles de gris), a pesar de que nuestro microdensitómetro llega a una resolución de 12 bits.

### **2.2. MEDIDA DE PUNTOS DE CONTROL Y APOYO. ORIENTACION**

Para poder realizar la restitución estereoscópica de un par de fotogramas es necesario, previamente, orientarlos para que formen un par estereoscópico (esto supone para un operador humano la posibilidad de apreciar relieve en la imagen y, con herramientas adecuadas, poder medir alturas del terreno). Una vez realizado este proceso, llamado de orientación, las alturas pueden obtenerse de la medida de los desplazamientos (paralajes) de los puntos a lo largo de las líneas llamadas epipolares.

El proceso teórico de orientación puede realizarse numéricamente a partir de las coordenadas sobre ambos fotogramas de al menos 5 puntos (puntos de control) y las coordenadas sobre el terreno de 3 puntos (puntos de apoyo) cuyas posiciones puedan medirse, igualmente, en los fotogramas.

Para realizar la orientación se define primeramente un sistema de coordenadas propio del fotograma con su origen en el centro del mismo (punto principal) y con ejes paralelos a sus lados, definidos éstos por las marcas fiduciales.

A continuación, vamos a describir el proceso de medición de las coordenadas de los puntos necesarios para la orientación. En primer lugar, presentamos la imagen digitalizada en un monitor de alta resolución. Sobre la pantalla medimos sus coordenadas con ayuda de un cursores móvil por medio de un ratón. Dado el gran tamaño de las imágenes, hemos de utilizar métodos que nos permitan presentar fácilmente distintas partes de la imagen total. Para ello, se presenta en una parte de la pantalla una versión reducida de la imagen total, en la cual, se elige la zona de interés en la que se quiere medir un punto, siendo posible siempre recuperar la imagen reducida. Inmediatamente se presenta en pantalla esa zona sobre la que ya se pueden medir las coordenadas (X, Y) con precisión de un pixel. El sistema de coordenadas usado es el de digitalización, definido por los ejes del microdensitómetro y con origen en el punto desde el que se inició la misma.

Para cada fotograma, inicialmente se miden las coordenadas de las marcas fiduciales, y así, hallamos la transformación entre el sistema de digitalización y el del fotograma, definidos anteriormente. Puesto que la medición en la pantalla no puede dar una resolución mayor que el tamaño del pixel, es necesario introducir un número mayor de puntos de control que el teóricamente necesario, para compensar la imprecisión de la medida. De nuestros estudios se desprende que unos 20 son suficientes para garantizar una precisión del orden de 0.25 píxeles en la orientación (paralajes verticales residuales). Los puntos de control se eligen uniformemente distribuidos por la zona de solapamiento del par.

Como ayuda a la medida de coordenadas hemos añadido al programa algunas herramientas que permiten mejorar la visibilidad de la zona de interés: zoom local, variación de contraste interactiva, binarización y pseudocolor.

En cuanto a los puntos de apoyo, hemos de restringirnos a los que vengan dados por el trabajo en campo o aerotriangulación, pero se utilizan siempre todos los disponibles, que suelen ser más de los estrictamente necesarios. Sin embargo, no se obtiene una precisión planimétrica mayor que la dada por el tamaño del pixel, debido a que el número de puntos no es suficientemente grande.

Además de estos datos, son también datos necesarios para la orientación, la focal de la cámara empleada en el vuelo y el tamaño del pixel de digitalización de los fotogramas.

La resolución de las ecuaciones de orientación se obtiene por el método de mínimos cuadrados, ya que disponemos de datos sobreabundantes. La solución consiste en un conjunto de parámetros geométricos que se utilizan posteriormente en distintos pasos del proceso. Este conjunto de parámetros puede expresarse en términos de tres giros, una traslación y un factor de escala (Chueca Pazos, 1982).

### **3. RESTITUCION AUTOMATICA**

#### **3.1. PREPARACION DE LAS IMAGENES**

Una vez calculados los parámetros de orientación se genera un nuevo par de imágenes a partir de las originales. Este par se produce de manera que cumpla una serie de requisitos que facilitan enormemente el resto del proceso.

En primer lugar, el nuevo par contiene únicamente la zona de solapamiento del par original, definida a partir de un paralaje de referencia. Este paralaje corresponde a una altura media del terreno en el área cubierta.

A continuación, las nuevas imágenes se generan de forma que las líneas epipolares queden horizontales en las mismas, es decir, el par está orientado. Esto puede realizarse gracias a los parámetros obtenidos en el proceso de orientación. Así, cualquier punto de un fotograma ha de encontrarse, de estar presente, en la misma línea horizontal del otro fotograma.

Finalmente, para facilitar la comparación de las dos imágenes, se corrigen los valores de los píxeles (nivel de gris) de forma que los histogramas sean parecidos. Por el momento, esta corrección se limita a un reescalado lineal basado en la posición del máximo y la anchura de ambos histogramas. En el futuro planeamos estudiar métodos más elaborados que nos permitan garantizar una mayor similitud de ambos histogramas.

#### **3.2. IDENTIFICACION DE PUNTOS HOMOLOGOS. MEDIDA DE PARALAJES**

Esta es una parte crucial del proceso, ya que en ella se trata de simular la tarea que realiza un operador humano en un restituidor. Esta tarea consiste en hallar correspondencias (Maître, 1988) entre puntos de ambas imágenes (puntos homólogos). El proceso se desarrolla del siguiente modo: una vez seleccionado un rasgo puntual de una de las imágenes se explora la línea epipolar correspondiente en la otra imagen tratando de encontrar ese mismo rasgo y determinar su posición. La exploración se realiza por medio de funciones de correlación de las cuales se extraen una serie de posibles correspondencias. Posteriormente y también por correlaciones se determina la correspondencia correcta de entre las anteriores.

La selección de rasgos puntuales se realiza sobre la primera imagen en función de la derivada horizontal de los valores de pixel (Pratt, 1978). El criterio utilizado consiste en tomar aquellos puntos que presenten un máximo o mínimo relativo en su derivada y ésta supere una cierta cota.

Para resolver el problema de la correspondencia entre imágenes, hemos desarrollado un proceso basado en la correlación. Este método consiste en calcular, para la imagen y para su derivada horizontal, la función de correlación en un entorno alrededor de un punto seleccionado en la primera imagen y un intervalo sobre la línea epipolar de la segunda imagen. Luego, se calcula una nueva función que es la media geométrica de las dos anteriores (figura 1), corregida por un factor que da cuenta de la similitud, en valor absoluto, entre los entornos que correlacionamos. En los puntos en que al menos una de las correlaciones es negativa, la función toma valor cero. La ventaja de esta nueva función estriba en que en ella sólo perviven aquellos máximos que estaban en posiciones idénticas en ambas correlaciones, con lo cual, tenemos garantizada, para esa posición, una buena correlación tanto en grises como en derivadas. De los máximos relativos de esta función se obtiene una serie de correspondencias candidatas. No es posible, en este punto, elegir la correspondencia correcta, porque la máscara utilizada para calcular las funciones de correlación es pequeña.

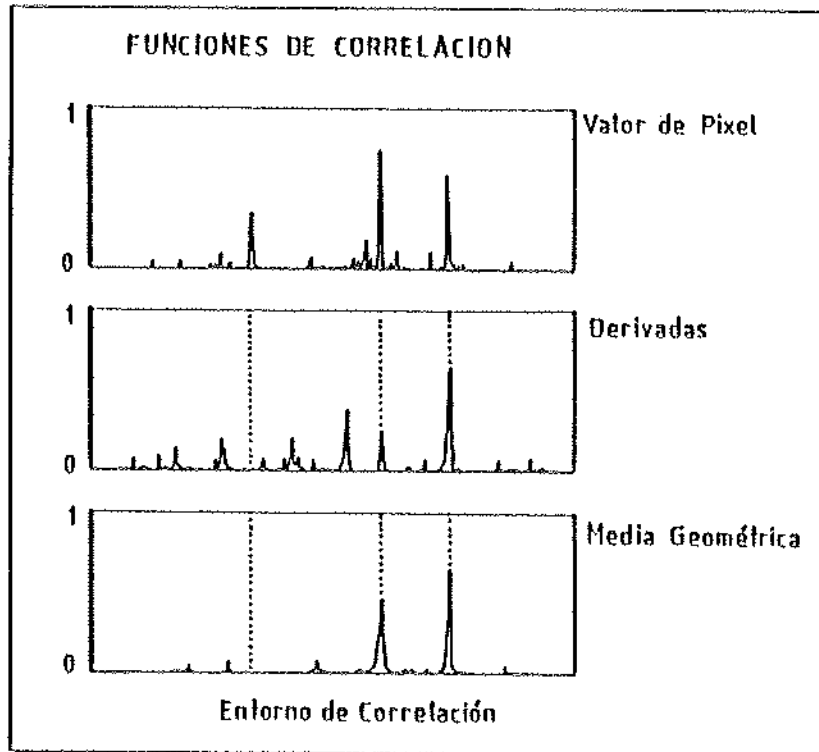


Figura 1.— Ejemplo de funciones de correlación usadas para identificación de puntos homólogos.

La elección de qué máximo (correspondencia) es el correcto se hace calculando la correlación en un área mayor alrededor de cada uno de los candidatos. A su vez, estas correlaciones se pesan con un factor de similitud como ya explicamos anteriormente. Tomamos como posición definitiva aquélla que da un valor mayor de correlación, siempre y cuando se cumplan unos criterios mínimos que consisten en: un valor mínimo de correlación y del cociente entre los valores del primer y segundo máximo. De esta manera, podemos rechazar una correspondencia si el máximo de la correlación no supera una determinada cota o si existen dos candidatos con valores de correlación parecidos (en el área mayor).

Por fin, una vez validado el punto por el procedimiento descrito, se almacenan sus coordenadas en la primera imagen y el paralaje dado por la diferencia de coordenadas X del pixel en la primera imagen y el centroide del máximo de la función de correlación en la segunda imagen.

Un punto clave de todo este tratamiento, con una influencia muy importante sobre los tiempos de cálculo necesarios, es el relativo a la longitud de los intervalos sobre las líneas epipolares utilizados para buscar la posición del punto homólogo. Como es lógico, un intervalo menor repercutirá en un ahorro de tiempo en el cálculo de las correlaciones, y a su vez, también significará un menor número de máximos de correlación a analizar y validar con un área mayor. Todo ello se refleja indirectamente en una mayor fiabilidad de las correspondencias encontradas.

Una manera de tener un intervalo de correlación pequeño consiste en partir de entrada con una buena estimación del paralaje, de forma que nos situemos muy cerca de la posición correcta. Para conseguirlo hemos adoptado una estructura jerárquica similar a la adoptada por otros autores (Perlant, et al., 1988), en la que en cada paso se adoptan los valores aproximados obtenidos del análisis de dos imágenes, semejantes a las originales, de tamaño reducido. El tiempo total empleado en este proceso es apreciablemente menor que el que se emplearía en el caso inicial con píxeles de 50 micras e intervalos de búsqueda libres.

### 3.3. ELIMINACION DE ERRORES

A pesar de las precauciones tomadas para garantizar la validez de los paralajes medidos, es posible, y de hecho ocurre, que entre los puntos finales haya puntos falsos. Es decir, se han hecho corresponder puntos que se parecen pero que no son homólogos.

Para eliminar los puntos falsos utilizamos distintas comparaciones entre los puntos obtenidos. Contamos para ello con la ventaja de que los puntos falsos son una minoría respecto al total (del orden del 4% de los puntos totales encontrados).

En primer lugar, la lista de puntos obtenidos se clasifica por líneas horizontales. Luego se eliminan los grupos de puntos que presenten inversiones de orden entre sus posiciones en ambas imágenes.

En segundo lugar, debido a los tamaños de las cajas utilizadas para el cálculo de las funciones de correlación, tampoco puede ocurrir que puntos muy próximos en una de las dos imágenes tengan sus correspondientes homólogos en posiciones muy distantes. Si en la lista de puntos clasificada por líneas se da esta situación, al menos uno de los puntos ha de ser falso y en consecuencia, por precaución, eliminamos los dos.

En tercer lugar, se compara el paralaje de un punto con los de sus alrededores descartando éste si es muy diferente de aquéllos. Por último, se rechazan los puntos aislados, es decir, aquéllos en que no se ha encontrado ningún otro en sus proximidades.

## **4. APLICACIONES: MODELOS NUMERICOS Y ORTOFOTOGRAFIAS**

### **4.1. CALCULO DE COORDENADAS DEL MODELO**

Una vez filtrada, la lista de coordenadas y paralajes de los puntos homólogos se convierte, con la ecuación de colinearidad (Chueca Pazos, 1982), en otra lista, de coordenadas X, Y, Z, referidas a un sistema intermedio que aún no es el del terreno. Las coordenadas Z así obtenidas, se colocan sobre una malla regular cuadrada asignando cada Z al nodo de la malla de coordenadas X e Y más próximas.

Es de notar que al final de este proceso tenemos una malla regular con valores asignados a alrededor del 15 por 100 de sus nodos. Esto significa que para el área de solapamiento de un par se obtiene el paralaje de más de un millón de puntos. El 85 por 100 restante de los nodos se determina por interpolación, obteniéndose así, un modelo numérico regular del tipo de los habituales salvo en la arbitrariedad del sistema de coordenadas a que está referido.

En la fotografía 1 puede verse un ejemplo de uno de los modelos obtenidos en este punto del proceso (previo a la interpolación). El modelo se ha codificado en colores por medio de una paleta que varía uniformemente del rojo al azul pasando por el verde, correspondiendo el rojo a alturas mayores y el azul a menores. En la fotografía 2 se muestra este mismo modelo una vez interpolado.

### **4.2. ORTOFOTOGRAFIAS Y MODELOS NUMERICOS DEL TERRENO**

A partir del modelo descrito en el punto anterior, puede obtenerse un modelo numérico del terreno generando una nueva malla referida al sistema de coordenadas del terreno (U.T.M.). Por este método conseguimos modelos de calidad aceptable con pasos de hasta 30 m a partir de escalas de fotograma de 1:25.000. Por el momento, los modelos con pasos menores están en una fase experimental aunque cerca de las precisiones obtenidas por métodos convencionales.

Igualmente, con la malla regular interpolada es posible calcular la transformación entre proyección central y ortogonal que permite obtener una ortofotografía a partir de uno de los fotogramas. Por fin, la ortofotografía se procesa para mejorar su contraste y definición, lo que facilita su reproducción en papel con una calidad visual adecuada.

En la fotografía 3, se presenta una ortofotografía obtenida por el método descrito. La población que aparece en la misma corresponde al término municipal de Andújar. La ortofotografía se ha generado de forma que al representar sobre papel cada pixel por un cuadrado de 0,2 mm de lado se obtiene una escala 1:10.000. Obviamente, ésta no es la escala que aparece en esta publicación, siendo ésta del orden de 1:50.000. Se ha ajustado el tamaño de la fotografía 3 para que coincida con los modelos correspondientes (fotografías 1 y 2).

## 5. RESULTADOS

### 5.1. TIEMPOS DE CALCULO

El programa que realiza este proceso se ha desarrollado en un ordenador MicroVAX 3.600 y compilador VAX11-FORTRAN. De esta forma el proceso no tiene ninguna dependencia con una máquina en particular. De hecho, la fase inicial del desarrollo se realizó en un ordenador Eclipse MV/20000 y compilador de fortrán F77 de Data General.

En estas condiciones (MicroVAX 3600), el tiempo total de ejecución del programa para la generación de una ortofotografía 1:5.000 y el modelo correspondiente a partir de un par de escala 1:25.000, es de unas 16 horas. Si los requerimientos de precisión no son muy altos, el programa permite realizar el proceso en tiempos menores, deteniendo la exploración jerárquica de los fotogramas en niveles más groseros. De este modo, para el caso en que se detenga el proceso en el penúltimo nivel, el tiempo de ejecución es de unas 5 horas. Estos tiempos dependen en parte de la orografía del terreno, siendo mayores para terrenos más irregulares.

### 5.2. PRECISIONES OBTENIDAS

No hemos podido, hasta el momento, efectuar un estudio exhaustivo de las precisiones de los modelos numéricos obtenidos. No obstante, hemos comparado puntos obtenidos por nosotros con un modelo numérico cedido amablemente por el Instituto Cartográfico de Cataluña. Puesto que nuestro modelo se obtuvo de un par de escala (1:22.000) distinta al usado por el I.C.C. (1:70.000) y que la zona era extremadamente abrupta (750 m de desnivel dentro del área de solapamiento), la comparación es sólo una estimación. El error cuadrático medio calculado es de 1.9 m lo que parece indicar que la precisión de nuestro modelo es aceptable.

También se han efectuado otras estimaciones por medio de la comparación de curvas de nivel obtenidas a partir de un modelo y las de un plano, así como de la superposición de ortofotografías y planos. Todos estos resultados indican que la precisión de modelos de escala media o pequeña, y ortofotografías en general, es la aceptada normalmente.

## 6. CONCLUSIONES

Hemos presentado en este trabajo la descripción de un método para la generación de ortofotografías y modelos numéricos del terreno, a partir de pares estereoscópicos aéreos de escalas medias, de forma digital y casi totalmente automática.

De cara al usuario, el proceso se reduce a la digitalización de los fotogramas, medida en el monitor gráfico de puntos (marcas fiduciales, puntos de control y puntos de apoyo) y reproducción en soporte adecuado del resultado. Esta última puede realizarse por medio de un foto-impresor de los existentes en el mercado.

Por todo lo expuesto anteriormente, creemos que la restitución estereoscópica automática digital es, no sólo posible, sino, además, comparable con los métodos clásicos para la producción de ortofotografías. Creemos, también, que lo mismo será aplicable, en un futuro próximo, a modelos del terreno con pasos de hasta 5 m.

Un ejemplo de las posibilidades del método puede verse en la fotografía 4. En esta fotografía se muestra, en forma de gráfica con codificación de colores superpuesta, un modelo numérico de la zona de Calatayud obtenido a partir de la unión de 12 modelos numéricos individuales correspondientes a otros tantos pares. Esta fotografía ha sido amablemente cedida por Galileo de Ingeniería y Servicios, S.A., la cual está preparando la explotación comercial del programa en su vertiente de producción de ortofotografías.

El proceso descrito se basa totalmente en su soporte lógico y por tanto es evidente que la velocidad del mismo sólo está limitada por la del ordenador en que se ejecute. Así, a medida que en el futuro dispongamos de máquinas más rápidas la producción será más rápida, lo cual representa una ventaja frente a los métodos clásicos. Una de las principales fuentes de mejora puede ser la utilización de procesadores paralelos en los que los procesos de tratamiento de imágenes son extremadamente eficaces.



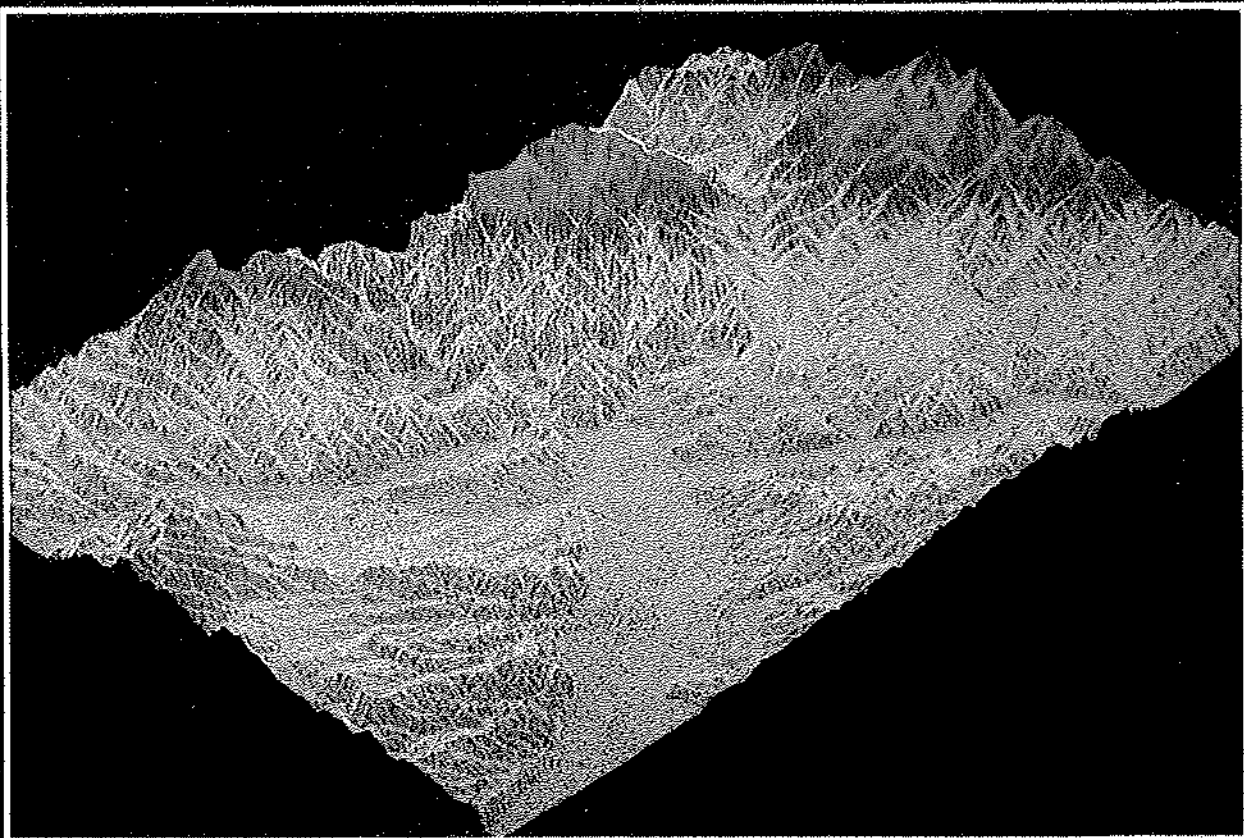
FOTO, 1  
Modelo original



FOTO, 2  
Modelo interpolado



FOTO, 3  
Ortofotografía



FOTO, 4  
Mosaico de modelos

## 7. AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a M. Briganti, G. Pérez del departamento de fotografía y a R. Castro del departamento de delineación sus esfuerzos en la realización de las ilustraciones.

## BIBLIOGRAFIA

Chueca Pazos, M. 1982. **Topografía, Vol. 2.** ed. Dossat. Madrid. pp. 902-912.

Grün, A. 1989. New developments in digital photogrammetry. Conferencia impartida en el Instituto Cartogràfic de Catalunya, 3-4 de octubre de 1989.

Maître, H. 1988. How to solve the correspondance problem. Département Images, 88 IMA 002. Ecole Nationales Supérieure des Télécommunications. Paris.

Perlant, F. et al. 1988. Stéréorestitution sur imagerie SPOT d'une zone du Burundi. **Bull. Soc. Languedocienne Géo.** 22: 77-95.

Pratt, W.K. 1978. **Digital image processing.** ed. John Willey & Sons. New York. pp. 479-484.